

カーボンニュートラルやエネルギー安全保障の実現に向けた 革新炉開発の技術ロードマップ（骨子案）

目次

1. 検討の背景
 - 1.1. カーボンニュートラル・エネルギー安全保障を巡る世界の潮流
 - 1.2. 革新炉開発の技術ロードマップの検討
2. 革新炉によるカーボンニュートラル・エネルギー安全保障への貢献
 - 2.1. 燃料やサプライチェーンの地政学リスクへの対応
 - 2.2. レジリエンス・セキュリティリスクへの対応
 - 2.3. 産業の空洞化リスクへの対応
 - 2.4. 循環型エネルギーへの挑戦
 - 2.5. 非エネルギー分野のイノベーションへの貢献
3. 各炉型の評価軸と評価
4. 革新炉開発における課題と対応策
 - 4.1. 革新炉開発を巡る悪循環
 - 4.1.1. 革新炉開発に係る方向性の明瞭化
 - 4.1.2. 開発予算・施設の整備
 - 4.1.3. 革新炉開発を支える事業環境の整備
 - 4.1.4. 開発の司令塔機能の強化
 - 4.1.5. サプライチェーンの維持・強化
 - 4.2. 革新炉開発を巡る悪循環を断ち切る対応の方向性
 - 4.2.1. 2050年カーボンニュートラルに向けた革新炉開発ポートフォリオとロードマップ
 - 4.2.2. システムエンジニアリング機能を強化するプロジェクトの創出・支援
 - 4.2.3. 安全性に優れた革新炉開発推進のための規制対話の推進、ファイナンス・バックエンドを含めた事業環境の整備
 - 4.2.4. 民間のイノベーションを喚起する開発の司令塔
 - 4.2.5. 革新炉サプライヤの挑戦の支援

1. 検討の背景

1.1. カーボンニュートラル・エネルギー安全保障を巡る世界の潮流

- 近年、150以上の国と地域が、期限付きのカーボンニュートラル目標を表明しており、そのGDP総計は世界全体の約90%を占めている。各国は脱炭素技術開発に大規模予算を措置し、あらゆる産業において、ESG投資やサプライチェーンの脱炭素化等、国・産業界を巻き込んだ脱炭素社会に向けた大競争時代に突入。こうした中、気候変動対策と統合的な国家戦略・ビジネスが、国際競争力の前提条件になりつつあると言える。
- 日本も、2050年のカーボンニュートラルを表明しており、社会全体でのカーボンニュートラル実現には、電力部門の脱炭素化に加え、産業・民生・運輸部門の燃料・熱利用において、脱炭素電源による電化を推進するとともに、水素、メタネーション、合成燃料等による脱炭素化を進めることが必要。電化の進展に伴い、2050年には約3~6割電力需要が増加との試算もある。
- 2050年カーボンニュートラルに向けて、S+3Eのバランスを取りながら原子力を含めたあらゆる選択肢を追求していくことが重要。近年では、エネルギー技術の部材、鉱物資源等のサプライチェーンを安定的に維持していく経済安全保障の重要性に加え、本年2月に発生したロシアによるウクライナ侵略や電力需給逼迫を受け、エネルギーの安定供給があらゆる経済・社会活動の土台であり、エネルギー安全保障なしには脱炭素の取組もなしえないことを再確認。

燃料やサプライチェーンの地政学リスク

- 現在、我が国の電力供給の7割以上を火力発電が占めている。また、鉄鋼業や化学コンビナート等のエネルギー多消費産業は、臨海部に立地し、需要地に近接して大型の火力発電所を建設、電力や産業プロセスに必要な熱を供給する形で、産業競争力を維持してきた。
- 一方、石油・天然ガス等の化石資源の安定供給や価格変動にリスクを内在しており、ウクライナ危機等に伴う化石燃料資源の価格急騰で、こうしたリスクが顕在化。また、シーレーンのチョークポイントリスク等も、引き続き、重大なリスク要因となっている。
- また、2050年カーボンニュートラルに向けては、エネルギー安定供給の要となる戦略リソースとして、脱炭素技術も考慮に入れる必要。これに伴い、化石燃料を始めとした燃料資源に加え、脱炭素技術を構成する技術や部材、鉱物資源等のサプライチェーンの供給途絶リスクを、新たな地政学リスクとして認識する必要がある。

レジリエンス・セキュリティリスク

- 我が国においては、近年大規模な自然災害が頻発し、大規模な停電が発生する等、非常時のエネルギー安定供給のリスクが顕在化。
- 再生可能エネルギーを最大限導入していく観点から、その出力変動への対応も系統全体のレジリエンスにとって重要。
- 加えて、ウクライナ危機は原子力の核拡散・核セキュリティのリスクへの対応が重要であることを喚起。デジタル化に伴うデジタルセキュリティリスクへの対応強化も必要。

産業の空洞化リスク

- カーボンニュートラルに向けては、二酸化炭素を排出しない大量で安価な水素・熱・電力の安定供給が必要。燃料・サプライチェーンの供給途絶リスクや災害等のレジリエンスリスクがある環境下では、エネルギーの安価安定供給を前提とする製造業が海外流出し、産業が空洞化し、雇用が失われ、公正なエネルギートランジションが進まない可能性も考えられる。

1.2. 革新炉開発の技術ロードマップの検討

- 国内で安全性を大前提とした原子力発電所の再稼働を着実に進め、最大限活用していくことはもちろん、安全性、経済性、廃棄物、エネルギー効率、核不拡散性、資源の有効利用等の観点から優れた技術を取り入れた革新炉の開発・社会実装を進めることによって、カーボンニュートラル・エネルギー安全保障を巡るリスクに対応することが可能。そのため、欧米では、既設炉への財政支援等に加え、革新炉についても、大規模予算支援によってイノベーションを加速。
- こうした海外の動向やカーボンニュートラル・エネルギー安全保障を巡る環境変化も踏まえ、原子力イノベーションを通じて、再エネとの共存、水素社会への貢献といった、原子力の新たな社会的価値を再定義した上で、国内の炉型開発に係る課題を整理しつつ、その戦略を示した革新炉開発の技術ロードマップを検討する。

2. 革新炉によるカーボンニュートラル・エネルギー安全保障への貢献

2.1. 燃料やサプライチェーンの地政学リスクへの対応

高品質サプライチェーンを誇る準国産エネルギー

- 原子力発電は、燃料投入量に対するエネルギー出力が圧倒的に大きく、発電コストに占める燃料費が約 15%¹であり、約 50%の火力に比べて燃料価格の影響を受けにくい。また、一度燃料を装荷すれば、約 1 年間運転が可能で、燃料の長期貯蓄も可能であることから、準国産エネルギー源として扱われてきた。
- 日本においては、約 1000 万個の部品点数についてサプライチェーンを国内に持ち、国産化率はほぼ 90%²を超える他、欧米のプロジェクトに日本メーカーが主要な資機材を提供する等、その技術力は健在。
- 次世代の革新炉についても、ナトリウム冷却高速炉の実験炉「常陽」、原型炉「もんじゅ」、高温ガス炉の試験炉「高温工学試験研究炉 (HTTR)」の設計・建設・運転・保守の経験があり、「常陽」、「HTTR」を始め、革新炉開発に欠かせない試験設備も保有。
- 現在、欧米で複数の革新炉建設プロジェクトが進行する中、日本国内の高い製造・研究開発基盤への期待から、協力の要請がされているところ。カーボンニュートラルに向けた国内のオプションとしてのみならず、欧米諸国の原子力産業基盤維持と世界の脱炭素に貢献できる可能性。

燃料の国産化に貢献する高速炉

- 日本のウラン燃料は、オーストラリアやカナダ等、地政学的に安定している国からの輸入が多い。中長期的に世界がカーボンニュートラルを目指す中で、ウラン価格も上昇トレンドにあり、また、ウクライナ危機を受け、更に各国がロシアからの燃料輸入を控えることで、ウラン価格は急騰している。
- こうした中で、天然ウランの 99.3%を占める燃えないウランを高速炉の中の高速中性子で転換して生成されるプルトニウムに加え、半減期が長いマイナーアクチノイドも燃料とすることで、現存の資源量によって 3000 年以上のエネルギー供給を可能とし、更なる天然ウランの供給を要さず、燃料を国内で生産できることから、原子力のエネルギー安全保障を抜本的に強化できる。
- 欧州のタクソミーの議論においても、2045 年以降は資源循環性を念頭に、閉じた燃料サイクルの炉型への投資を持続可能であると解釈している。

¹ 資源エネルギー庁「総合資源エネルギー調査会 発電コスト検証ワーキンググループ」資料より引用
(https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/cost_wg/pdf/cost_wg_20210908_01.pdf)

² RIETI：原子力発電の効率化と産業政策—国産化と改良標準化—より引用
(<https://www.rieti.go.jp/jp/publications/summary/14050002.html>)

コラム：国家安全保障戦略としての米欧の革新炉開発

- 現在、世界で建設・計画中の PWR の 60% 近くが中口製であり、両国は戦略的に海外への輸出を展開。強靱なサプライチェーンを基盤に、革新炉開発でも世界に先行。ロシアは 2016 年に高速炉の実証炉を、中国は 2021 年に高温ガス炉の実証炉を運転開始。
- 一方、米欧は約 20 年にわたるプロジェクト不在で、原子力サプライチェーンが脆弱化。こうした状況を受け、米英は原子力の技術リーダーシップ再興を戦略として掲げ、2030 年頃までに運転開始を目指し、革新炉の実証炉プロジェクトを立ち上げ、大規模な政府支援を実施。
- 特に米国は大統領覚書を受け策定した「原子力エネルギーにおける米国のリーダーシップ回復戦略」（2020 年策定）において、国家安全保障の観点から、革新炉開発の推進等を通じて、健全な米国の民生原子力産業と米国のイノベーターとしてのリーダーシップ回復を勧告。
- グローバルな核不拡散レジームに対する信頼を盤石にし、技術輸入国と 100 年にわたるパートナーシップ構築等をビジョンに掲げる。グローバル展開・サプライチェーン構築においては日本など有志国との関係を重視。人材・サプライチェーン基盤維持に民生原子力産業による規模の経済の必要性にも言及。
- 本戦略を踏まえ、米国政府は 2020 年より革新原子炉実証プログラム（ARDP）において、2028 年までに革新炉の実証炉 2 基の運転開始等を目指し、プロジェクトを開始。

表 1. 革新炉開発予算の比較表（米英仏）

	大型軽水炉	非従来型炉研究開発
米国	<p>◆既設支援</p> <ul style="list-style-type: none"> - 経済的困難な状況にある既設炉への財政支援(クレジット付与) <p>\$60億(約6,000億円) / 5年間</p>	<p>◆研究開発</p> <ul style="list-style-type: none"> - 革新炉実証プログラム(ARDP)【2028年運転開始目標】 ・TerraPower社(高速炉)：\$20億(約2000億円) ・X-energy社(高温ガス炉)：\$12億(約1200億円) - SMRの技術開発支援・財政支援 ・NuScale)【2029年運転開始目標】 ：\$5.3億(約530億円) (R&D) \$13.55億(約1355億円) / 10年間(運営主体支援)
英国	<p>◆新設支援</p> <ul style="list-style-type: none"> - 大型原子力発電所の新規建設支援 <p>最大 £ 17億(約2,500億円)</p> <p>◆「エネルギー安全保障戦略」（2022年4月）</p> <ul style="list-style-type: none"> - 2030年までに最大8基の建設計画 	<p>◆研究開発</p> <ul style="list-style-type: none"> - 「革新原子力ファンド」(2020年12月) ・SMR開発：£ 2.15億(約322億円) ・高温ガス炉実証炉開発【2030年代初頭運転開始目標】 ：£ 1.70億(約255億円) - 「未来の原子力実現基金」(2022年5月) ：£ 1.2億(約180億円)
仏国	<p>◆新設支援</p> <ul style="list-style-type: none"> - 「France Relance」(2020年9月) ・人材支援：€約1.1億(約143億円) ・中小企業支援(ファンド創設) <p>：総額€2億(約260億円)</p> <p>◆マクロン大統領は、2022年2月に「6基のEPR2の新設に着手し、更に8基の新設に向けた検討を開始」と宣言。</p>	<p>◆研究開発</p> <ul style="list-style-type: none"> - 「France Relance」(2020年9月) ・小型炉NUWARD：€5000万(約65億円) - 「France2030」(2022年5月) ・小型炉NUWARD：€5億(約650億円) ・廃棄物管理が容易な炉：€5億(約650億円)

2.2. レジリエンス・セキュリティリスクへの対応

炉型革新による革新的安全性

- 革新炉による炉型革新によって、より合理的に地震や津波等の自然災害、航空機衝突といった外部ハザードへの対応強化が可能。自然循環や圧力差による冷却を含め自然法則を安全機能に採用した受動的安全炉の開発・導入が、東京電力福島第一原子力発電所事故後も進展。
- 革新軽水炉では、上記のような更なる安全性向上対策に加え、重大事故時も環境影響を防ぐコアキャッチャーや、放射性希ガスの分離・貯留設備等の緊急時の避難や土地汚染を防止する対策も可能。小型軽水炉では、設計のシンプル化で事故確率の大幅な低減を目指す。炉心溶解が基本的に発生しない高温ガス炉、自然に止める・冷える・閉じ込める機能を目指すナトリウム冷却高速炉は、実機経験を我が国が豊富に持ち、優れた安全性を持つ。
- また、燃料被覆管を金属でコーティングすること等により、酸化や水素発生を防ぎ安全性を高める事故耐性燃料の開発が国内外で進んでおり、海外では最速で2025年以降の既存軽水炉への導入、将来的には革新炉への導入も想定される。EUタクソノミーにおいては、2025年以降は事故耐性燃料を実装した原子力が持続可能であると記載。

水素製造や熱貯蔵、分散型電源等による系統の柔軟性・レジリエンス確保

- 風力や太陽光等の変動電源を電力システムへ統合し、最大限活用していく観点から、電力系統の柔軟性の確保が必要。低炭素電源の多様性を確保していくことも、社会・経済全体で脱炭素を進めていくためには重要。
- 革新軽水炉や小型軽水炉、高速炉、高温ガス炉等は、制御棒の組成の工夫、系統の電力需要に応じた水素製造や熱貯蔵、モジュールの個別の起動・停止等により負荷追従が可能となり、系統全体の柔軟性の向上にも貢献し得る。
- 電力系統内の太陽光、風力、蓄電池等の非同期電源の割合が増大し、電源脱落時のリスクが高まる中で、原子力は同期電源であり、系統に供給電力の周波数の安定化を図り一定の慣性力を供給することに貢献可能。
- 小型分散型電源としての小型軽水炉やマイクロ炉、系統分離された可搬型電源としての船舶搭載炉等も脱炭素化を進めていくために着目されている。

セキュリティリスクへの対応

- 核拡散抵抗性や核セキュリティへの対応、サイバーセキュリティといった新たなセキュリティリスクへの対応については、高速炉のマイナーアクチノイド含有燃料の開発による核拡散の技術的困難性の向上、半地下立地等による航空機衝突やテロを含む外部ハザードへの対応の強化、産業界大でのガイドラインの発刊等による対応が検討されている。

2.3. 産業の空洞化リスクへの対応

産業にカーボンフリーの電力・熱・水素の安定供給

- 鉄鋼や化学等の産業部門では、2050年カーボンニュートラルに向けて水素還元製鉄等の新たな取組が進められており、カーボンフリーの電力のみならず、大規模かつ経済的なカーボン

フリーの熱・水素の安定供給が必要。我が国には、2050年に20円/Nm³、2000万tの水素供給の目標があるが、各国は産業利用を念頭に水素を産業戦略として取り組む。

- 高温ガス炉は、少ない敷地面積で、天候に左右されず、大規模かつ安定的に、カーボンフリーの熱・水素を鉄鋼や化学等の産業部門に供給し、これら産業において地産地消できる可能性がある。
- 特に世界最高温度 950°Cを記録した試験炉「HTTR」の技術を活用すれば、水素製造と発電のコージェネレーションを実施することも可能であり、効率的な水素製造の可能性もある。

石炭火力のリプレイスによる既存インフラ・基盤の活用

- 米国は、今後老朽石炭火力の多くが閉鎖され、石炭火力の設備容量が同規模の小型軽水炉へリプレイスされることにより、既存の送電線等が活用できるだけでなく、技術専門性が類似しているため、労働者の再雇用もできると分析している。オランダやポーランドにおいても、大型の石炭火力廃止に備え、大型の軽水炉の新規建設方針を発表している。

2.4. 循環型エネルギーへの挑戦

放射性廃棄物の有害度・処分場面積の低減、資源の有効利用

- 核燃料サイクルの効果を更に高める高速炉サイクルでは、高レベル放射性廃棄物から潜在的有害度の高いプルトニウムやマイナーアクチノイドを抽出して燃料として再利用することで、潜在的有害度を自然界並³に低減する期間を10万年から300年に短縮することが可能。放射性廃棄物の発生量も1/7、必要な放射性廃棄物の処分場の面積も1/10に低減。
- 資源の有効利用も可能で、天然ウランの99.3%を占める燃えないウランを高速中性子で燃料化することで、現在の資源量によって、3000年以上のエネルギー供給を可能とし、長期的にはエネルギー安全保障の確保に貢献。
- 資源循環性を重視するEUタクソミーの議論においても2045年以降の原子炉は高速炉を含めた第4世代炉であるべきとのスタンスであり、原子力技術全体のパブリックアクセプタンス向上に貢献する可能性。

2.5. 非エネルギー分野のイノベーションへの貢献

がん治療薬など人々の命を救う医療用RIの製造

- 原子炉はエネルギー利用のみならず、医療分野で利用される放射性同位体（RI）を大量かつ安価に製造することに活用することも可能。現在、医療用RIが製造される世界の原子炉の老朽化が進み、将来的な供給が危ぶまれる一方で、例えばがんを含む悪性腫瘍に対する治療実績は20年前の4.5倍となるなど、医療用RIの需要は年々高まっている。
- 日本原子力研究開発機構が保有する軽水炉型の研究炉「JRR-3」や高速実験炉「常陽」⁴では、がん転移発見に使われるテクネチウム 99mの材料となるモリブデン 99を大量かつ安価に製造

³ 潜在的有害度とは、軽水炉の発電利用によって発生する高レベル放射性廃棄物を、仮想的に経口摂取した場合の放射線被ばくの影響を意味する。自然界並みとは、この高レベル放射性廃棄物による被ばく線量が、軽水炉の発電に必要な天然ウランを経口摂取した場合の被ばく線量と同程度になるという意味。

⁴ 2024年度末の再稼働を目指した取組を実施。

することが可能。また、「常陽」においては更に先進的ながん治療薬の原料となる希少な医療用RI アクチニウム-225 を高速中性子により製造することが可能。

- その他、三次元免震や遠隔技術、危険物質の閉じ込め、超断熱材料製造の技術等、原子力開発のなかで得られる技術は非エネルギー分野においても社会に貢献する可能性。

3. 各炉型の評価軸と評価

技術成熟度・時間軸

- 原子炉開発は、一般的に、実験炉（試験炉）の建設・運転を通じて実験的データを取得しつつ、実証炉や原型炉で経済性の見通しを得て、商用炉の量産段階となる。また、燃料技術開発には、試験炉や商用炉を活用した燃料照射が必要。
- 革新軽水炉は世界的にも建設・運転が進む既存軽水炉の技術の延長線上にあり、最も技術成熟度が高い。小型軽水炉も軽水炉の延長線上にあり、海外で2030年頃の初号機運転開始が計画されているが、初号機建設について不確実性もある。
- ナトリウム冷却高速炉、高温ガス炉は我が国に実験炉「常陽」、原型炉「もんじゅ」、試験炉「HTTR」の経験あり。「HTTR」においても2022年度より熱利用・水素製造実証事業を開始。
- 核融合は国際熱核融合実験炉「ITER」において2035年に核融合運転開始を計画しており、要素技術の開発段階。
- なお、米国では、コンピュータモデルも活用しながら安全裕度を十分に取って設計したフルスケールの革新炉型を、国立研究所の敷地内等に設置し、概念実証と性能実証を同時に実施することで商用化を10年程度早めるといった、新たな革新炉導入戦略も検討されている。⁵

規制対応

- 既存軽水炉をベースに新技術（受動安全やデジタル技術等）を導入した革新軽水炉は、技術成熟度が高く、最も規制の予見性が高い。
- 小型軽水炉については、2020年にNuScale社が米国規制当局（NRC）による設計認証（DC）を取得するなど、海外では小型軽水炉の規制に係る議論が進み、設計のシンプル化によるイノベーションへの規制対応が行われ、各国の規制機関が連携して検討されているが、現在国内には基準がなく、議論が必要。
- 自然に止める・冷える・閉じ込めるという機能を目指す高速炉や、炉心溶融が基本的に発生しない高温ガス炉では、「常陽」や「もんじゅ」、「HTTR」の再稼働審査の際に積み上げた知見を、将来の実証炉建設の際の規制基準策定に活用可能なことが期待される。

サプライチェーン

- 革新軽水炉は、高い国産化率を誇る既存軽水炉のサプライチェーンを活用可能。高速炉や高温ガス炉も、「常陽」や「もんじゅ」、「HTTR」の建設・運転の際のサプライチェーンを活用可能ではあるが、それらの建設から長期にわたり建設プロジェクトがなかったことから、サプライチェーンの一部に脆弱性。
- 小型軽水炉は既存軽水炉のサプライチェーンを活用できる部分が多いが、設計のシンプル化により我が国が得意とする大型鍛造品等が不要となるケースも想定される。核融合については、国際実験炉ITERに対して、日本企業がコイルなど一部機器を納品。

⁵ "The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World", MIT, 2018

2050年カーボンニュートラルを見据えた市場性

- **経済性**：出力密度の高い革新軽水炉では、既存軽水炉と同水準以上の経済性を目標。高速炉では、既存軽水炉と同水準の経済性を目標。海外の小型軽水炉は、設計のシンプル化によりガス火力並みの経済性を目指すものもあるが、高耐震等が求められる国内においては更なる検証が必要。高温ガス炉は電気・水素のコジェネレーションで経済性向上の可能性。
- **水素製造**：高温ガス炉、核融合炉については、高温熱源を利用した水素製造が可能。
- **負荷追従**：高温ガス炉や高速炉では、水素製造装置や溶融塩の蓄熱システムを組み合わせ、系統に送電をしない時間帯は水素製造や蓄熱をすることで負荷追従が可能。軽水炉においても原子力発電比率の高いフランスで一部の発電所を柔軟に出力調整する事例や、小型軽水炉はタービンバイパスやモジュール毎の制御により負荷追従を可能にする事例も。
- **資源の有効利用**：高速炉で生成したプルトニウムやマイナーアクチノイドを燃料とし、長期間のエネルギー供給が可能に。長期にわたり天然ウランの供給が不要となる可能性も。
- **廃棄物有害度・処分場面積低減**：高速炉では、半減期の長いマイナーアクチノイドが燃焼でき、高レベル放射性廃棄物の潜在的有害度が自然界並に低減する期間を300年に短縮可能。高温ガス炉は高燃焼度で処分場の面積低減の可能性。核融合は高レベル放射性廃棄物は原理上発生せず。

非エネルギー分野

- 高速炉における高速中性子を利用して生成される医療用RIを利用した先進的ながん治療や、軽水炉・高速炉において生成される医療用RIはがん移転発見が可能。
- その他、高温ガス炉は耐高温材料製造、核融合はコイル技術がヒッグス粒子発見に貢献。

表2. 革新炉開発のポートフォリオ

	技術成熟度・時間軸	規制対応	サプライチェーン	市場性					非エネ分野
				経済性	水素製造	負荷追従	資源の有効利用	廃棄物有害度低減	
革新軽水炉	◎ ※既存技術を活用可	◎ ※既存規制を活用可	◎ ※既存軽水炉のサプライチェーン有	◎ ※現行の軽水炉と同水準	△	○	△	△	○
小型軽水炉	海外	○	◎~◎ ※日本が得意とする大型鍛造品が不要のケースも	◎ ※米国のガス火力並が目標	△	○ ※モジュールごとの制御により負荷追従可能なものも	△	△	○
	国内	○	△ ※基準の議論が必要	◎~◎	?				
高速炉	○	○	◎ ※実証、もんじゅの実績	◎ ※現行の軽水炉と同水準	○	◎ ※溶融塩の蓄熱システムを組み合わせた負荷追従可能	◎	◎ ※Pu・MA燃焼可	◎ ※医療用RI製造可
高温ガス炉	○	○	◎ ※HTTRの実績	○⇒◎ ※コジェネで経済性向上	◎ ※高温を活用した水素製造可	◎	△	△ ※高燃焼度で処分場面積低減(◎)	○ ※耐高温材料製造技術の獲得
核融合炉	× ※要素技術の開発段階	△	◎ ※ITERで部分参加	?	◎	?	?	◎ ※高レベル放射性廃棄物発生せず	○ ※コイルがヒッグス粒子発見に貢献

コラム：米欧の革新炉型の選択

- **米国**：長期にわたる新設プロジェクトの不在により、大型炉の建設が長期化し、投資リスク低減のために、小型炉の開発に注力。また、米国技術リーダーシップの再興のため、2028年に実証炉を2基運転開始するという時間軸を定め、技術成熟度や負荷追従、水素製造、価格競争力といった観点から、高速炉と高温ガス炉を選定。
- **英国**：直近約50年間にわたって新設プロジェクトを実施してこなかったが、2022年「エネルギー安全保障戦略」において、世界的なリーダーシップを回復するため、2030年までに最大8基の軽水炉の建設計画を発表。また、自国の原子力潜水艦技術の応用で製造可能な小型軽水炉に注力し、2030年代初頭の運転開始を目指す。さらに、技術成熟度が高く、水素製造など熱利用が可能で、これまでの英国内におけるガス冷却炉の実績から既存サプライチェーンとの親和性が高い高温ガス炉が今後の実証炉プロジェクトに最適と評価。2030年代初頭の高温ガス炉実証炉の運転開始を目指す。
- **仏国**：2050年カーボンニュートラル実現に向けた電源シナリオ分析の結果（図1）、既存炉の運転延長、EPR2を14基建設（23GW）、SMR導入（4GW）を組み合わせ、2050年の再エネと原子力の比率を50%ずつとするシナリオが最も経済的と結論。原子力比率を一定程度維持することで、水素製造等の柔軟性の確保と、送電線増強コストを避けられる経済的メリットあり。2022年、マクロン大統領が6基の革新軽水炉EPR2の新設着手と、更に8基新設に向けた検討開始を表明。また、SMRは必ずしも必要ないが、投資リスク低減のために開発するとの位置づけ。
- **オランダ**：コスト超過・遅延の課題を最小化するため、実証済みで、安全かつ既に活用が進む大型軽水炉（第3世代炉+）を選択すべきとの市場関係者で幅広いコンセンサス。SMRも関心高いオプションであるが、商用化されるのは2027~2033年であり、初号機（FOAK）建設について不確実性があるとの評価。

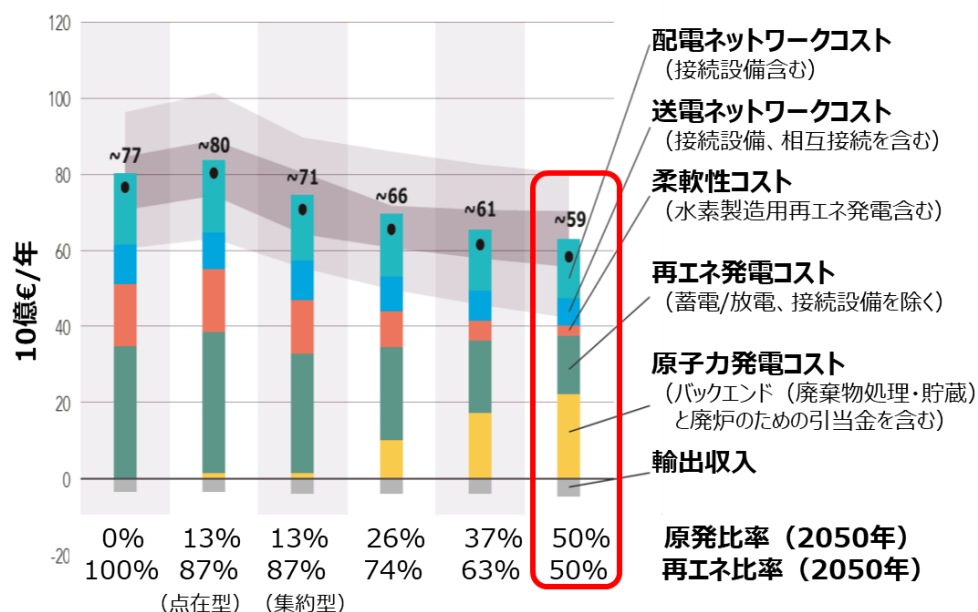


図1. 仏国における経済性におけるシナリオ分析

4. 革新炉開発における課題と対応策

4.1. 革新炉開発を巡る悪循環

- 福島第一原子力発電所事故以降、原子力開発の方向性が不明瞭となったことから、新規建設の具体的プロジェクトが途絶し、開発や施設整備への予算に加え、規制やファイナンス等の制度による支援が不足している。
- これに伴い、原子力開発の体制やそれに関わるサプライチェーンが脆弱化してきており、原子力開発全体の活動度の低下が見られている。こうした中、開発の方向性を明確化する材料が得られず、さらに方向性が不明瞭になるという悪循環に陥っている。

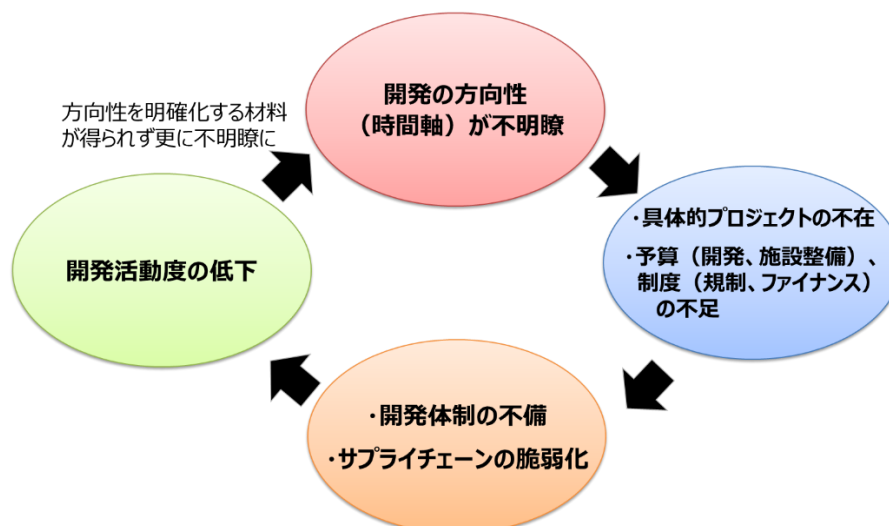


図2. 原子力開発工程の悪循環のイメージ

4.1.1. 革新炉開発に係る方向性の明瞭化

- 原子力開発は、概念設計・基本設計・詳細設計等の各設計段階において、機器・システムの技術実証のための高度なシミュレーション、試験や燃料・材料の照射試験等の研究開発を行いながら進めていく必要。
- 日本国内では、「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」や高速炉開発の「戦略ロードマップ」はあるものの、運転開始時期を念頭に置いたものとはなっておらず、炉ごとの開発マイルストーン・優先順位が不透明。

4.1.2. 開発予算・施設の整備

- 日本国内の革新炉開発予算は、資源エネルギー庁において直近20年間で最大でも年間100億円ほどで、ここ10年ほどは半減。日本原子力研究開発機構（JAEA）では、震災後、明確な研究開発目標が不透明となる中、全体の予算額の減少に加え、新規規制基準対応や廃炉等に予算が割かれ、革新炉研究開発予算は急減。
- 予算規模が不足する中、要素技術開発とフェージビリティスタディに終始せざるを得ず、炉システムとして開発するプロジェクト予算とならず、震災以前に築いた人材・技術基盤の維持も困難な状況。

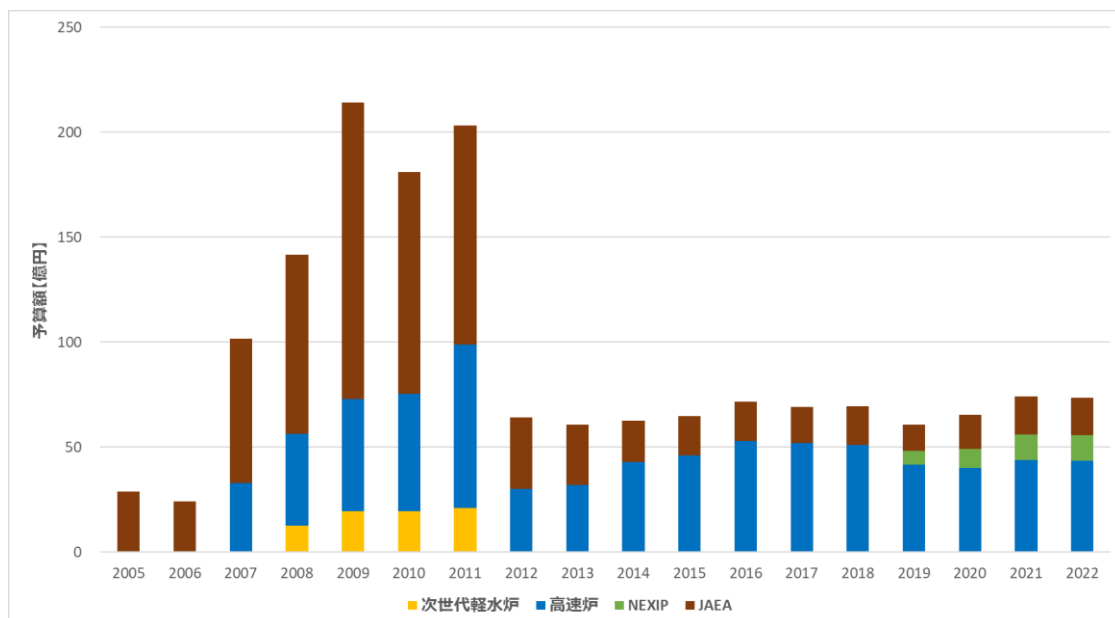


図3. 革新炉開発における年度当初予算の推移

4.1.3. 革新炉開発を支える事業環境の整備

- **規制**：米欧と異なり、国内の新規制基準は既存の軽水炉を念頭に基準を強化したものであり、革新炉規制は存在せず。また、革新炉開発を実施するメーカーが規制当局に申請前に相談できる制度もないため、規制の予見性を高めることができず、プロジェクトリスクが高い。規制当局側も初期段階から設計に習熟することができず、基準策定・審査が長期化する可能性。
- **ファイナンス**：欧米では新設を巡る大型初期投資対策として、建設期間中から料金を回収できる制度の整備や、初期投資の小さい小型炉へのシフトも見られる。国内では電力自由化以降、売電価格は市場価格に左右されるため、投資回収の予見可能性が低い。
- **バックエンド**：事業者が原子力事業を進めていくためには、廃炉や最終処分等のバックエンドのような原子力固有の課題への対応も含めた事業全体を俯瞰した環境整備が求められる。

コラム：米欧の革新炉規制・申請前審査

- 米英加等では、事業者や議会等の要請により、メーカーが規制当局に直接事前相談できるプロセスも含めた革新炉規制を整備している。一方、先行して開発が進められている NuScale でも、安全性向上を目指しているにもかかわらず設計認証（DC）取得に12年を要するなど、規制審査の速度は依然として課題が残っており、審査時間やコスト面を含めた審査プロセスの効率化に向けた議論が進められている。
- NuScale の DC 審査において産業界・規制当局で導き出した教訓を踏まえ、申請前審査での事業者との積極的な情報交換や難易度の高い課題を優先的に対応に引き続き取り組みつつ、2016年より革新炉向けの許認可近代化プロジェクト（LMP）を実施。
- LMP を通じて、リスク情報を活用したパフォーマンスベースの手法を採用することで、革新炉の安全性に見合った合理的な審査を可能とするガイダンスを、国研、産業界団体（NEI）、規制当局（NRC）の技術支援の下、事業者が作成し、NRC がエンドース。

- 「原子力エネルギー革新・近代化法案（NEIMA）」（2019年）に基づき、NRCは2027年までに13超の炉型の審査申請、6超の炉型の運転認可取得がなされることを念頭に、「革新炉のためのリスク情報を活用した技術に寄らない規制フレームワーク（Part 53）」を2024年までに策定すべく検討中。

4.1.4. 開発の司令塔機能の強化

- 日本の過去の開発では、「護送船団方式」が採用され、システム全体の設計を一貫性をもって実施する責任体制の明確化が課題となった。これを受けて、高速炉実用化研究開発においては、エンジニアリング機能を集積する中核メーカーを設定。
- 設計に限らず、研究開発の進捗を含め開発全体を統括し、技術的側面以外にも社会的側面についても適切にリソース配分を実施しながら効率的に開発を推進するプロジェクトマネジメント機能強化も必要。

コラム：米欧の開発の司令塔機能

- **米国**：1979年のスリーマイル島原子力発電所事故以降、原発新設と民生原子力開発予算が途絶。2015年から、米国エネルギー省（DOE）によって国研施設・人材を活用した民間イノベーション支援（GAIN）を開始したことを皮切りに、民間を主導とする革新炉開発を推進。2018年には革新炉開発の民間支援のため、「原子力エネルギー技術革新対応法（NEICA）」を制定し、2021年からは「先進的原子炉実証プログラム（ARDP）」を通じた革新炉開発の大型予算による民間支援を実施。また、DOE国研内に国立原子炉イノベーションセンター（NRIC）を設置し、民間企業が国研が有する高度な試験設備を活用できる仕組みづくりも実施。
- **カナダ**：かつて政策立案を行うカナダ天然資源省（NRCan）、政策の推進を中心的に行うカナダ原子力公社（AECL）で原子力開発を行っていたが、2014年にそれまで原子力開発を委ねられていた国立研究所を民営化し、カナダ原子力研究所（CNL）を設立。国際競争力向上やイノベーション促進のため、民間による国立研究所の利活用促進を目的として、連邦政府が研究施設を所有し、民間が運営する官有民営（GOCO）モデルを導入。
- **英国**：政策立案を行うビジネス・エネルギー・産業戦略省（BEIS）と、BEISから予算委託を受け研究開発を行う国立原子力研究所（NNL）という体制で革新炉開発を実施。50年ほどの間、炉型開発についてプロジェクトを行ってこなかったが、カーボンニュートラルの流れを受けて「エネルギー安全保障戦略」を策定し、2022年のうちに、新しい政府機関として「Great British Nuclear」を立ち上げ、新設プロジェクトの投資準備や建設期間中の支援等の環境整備を行う。

コラム：他産業・欧米におけるベンチャー支援の取組

- **宇宙分野**：国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）は、科学技術・イノベーション創出の活性化等による知識・人材・資金の好循環の構築を目的として、JAXA発ベンチャーの認定・支援制度を創設し、2015年より既に9つのJAXA認定ベンチャー企業が創立。

- **米国**：SMRについてはNuScale社（開発支援額：約530億円）、高速炉についてはTerraPower社（約2000億円）、高温ガス炉についてはX-energy社（約1200億円）といったベンチャー企業を革新炉開発の主体として、企画競争を通じた大規模な研究開発予算支援や国研の敷地内に立地場所を提供する等を実施。こうした政府支援を呼び水として、2021年に約3400億円の民間投資資金が原子力ベンチャーに流入。

4.1.5. サプライチェーンの維持・強化

- 日本国内では、1970年以降に運転開始した原発の多くで、原子力技術の国産化比率がほぼ90%を超えるなど、国内企業に技術が集積されており、国内の発電所の安定利用や経済・雇用等に貢献してきた。
- 一方、東日本大震災以降では主力である大型軽水炉においても再稼働の遅れや新規建設プロジェクトが途絶し、国内事業者の多くが将来の事業見通しが立たない状況。要素技術を持つ中核サプライヤ等の撤退が相次いでいる。「常陽」・「もんじゅ」、「HTTR」の建設を通じ獲得してきた高速炉・高温ガス炉のサプライチェーンも、20年以上実機プロジェクトが途絶され、一部に脆弱性。今後の見通しが立たない中で、技術・人材の維持やサプライチェーンの再構築のための投資ができない状況。
- こうした中、革新軽水炉や小型軽水炉は、既存の大型軽水炉サプライチェーンと共通する部分が多く、海外プロジェクトにおいては、自国の産業政策から国産比率を重視される傾向があるが、主要機器等の海外への市場展開にも期待があり、早期にサプライチェーンの事業機会、能力維持の機会になりうる。高温ガス炉は、国内においてバルブやポンプなど一部の要素技術に課題があるものの、炉内構造物や燃料に固有の強みを持つサプライヤも存在。高速炉は「もんじゅ」等のプロジェクトにおける製造実績に強みを持っており、今後、建設計画を表明している海外諸国に対し、要素技術の提供が可能。

コラム：諸外国の原子力サプライチェーン戦略

- **米国**：長期にわたり、原子力発電所の新設が行われなかった結果、原子炉容器等の主要機器の製造能力を喪失し、日韓等からの輸入に依存している一方で、既設炉市場を背景に燃料やポンプ、バルブ等については国内にサプライチェーンを維持。自国内で大型主要機器の製造ができない、という状況の中で、小型炉に注力し、将来の海外市場の獲得を狙う。サプライチェーン内で技術的強みがあり、エネルギー安全保障上重要な燃料分野に重点投資する方針。一方、大型機器については日本等の有志国とのサプライチェーン構築に期待。
- **英国**：長期間の建設期間の空白により、原子力の国内技術・ノウハウを喪失。ガス炉や原子力潜水艦の技術蓄積を踏まえ自国産比率向上の期待があるとして、高温ガス炉やSMRに注力しつつ、足元の革新軽水炉の国内建設においても、自国産比率向上のための機器・部素材の製造能力増強を大規模支援。
- **仏国**：フィンランドや英国での建設経験を通じ、燃料や原子炉容器、ポンプ等の広範な原子力サプライチェーンを維持。国内建設期間の空白による機器製造や溶接等の現場技能の低下を受け、EDFはフランス政府からの資本注入を原資に、製造業や現場の技能人材等への支援やタービン事業のGEからの買収により、サプライチェーンを強化。仏政府も、国内14基の革

新軽水炉の建設を宣言し、国内建設での教訓や高い自給率を活かし、他国への海外展開を図る方針。

- **韓国**：1970年代以降、アメリカから技術移転し、国産化を推進してきた。斗山重工を中心とする燃料や原子炉容器、ポンプ等の広範な自国原子力サプライチェーンを確立。前政権の脱原子力政策により原子力産業は疲弊するものの、韓国輸出入銀行からの大規模融資や官民でのトップ外交を通じ、海外プロジェクトを受注し、一定の製造機会を獲得。政権交代後は、国内での原子力の積極利用、新設再開を表明している。
- **中国**：欧米諸国に先駆けて革新軽水炉等の建設、運転開始を実現しており、国産炉型も開発・実装済。日本を含む諸外国からの技術移転を足掛かりに国内三大重工メーカーによるサプライチェーンを構築し、2010年以降は国産化率も着実に向上。
- **ロシア**：ROSATOM社の下にすべての原子力関連企業が集積しており、民生用原子力部門を統括するアトムエネルゴプロム（AEP）社があらゆるサプライチェーンを自社で保有し、海外含むVVERの設計・建設を一手に引き受け。
- 中露ともに、輸入国の負担割合等に関するOECDの輸出信用アレンジメントルールに拘束されない強力な政府ファイナンス支援を通じ、海外展開を推進し、新興国への輸出に成功。特に、ロシアは、現地国の法規制整備・現地企業への発注等のパッケージ支援や継続的な燃料事業収益を見込んだプラント単価削減により、受注確度を向上。

表3. 主要国の原子力サプライヤ

構成機器	米国	英国	仏国	韓国	日本
エンジニアリング	Shaw Group Bechtel	NNB GenCo (EDFエナジーの子会社)	EDF	KEPCO E&C	三菱重工業 日立GE 東芝ESS
燃料	Westinghouse GE	Springfields Fuels	Framatome	Korea Nuclear Fuel Company	三菱原子燃料 GNFJ 原子燃料工業
濃縮	Louisiana Energy Services LLC	URENCO UK	Orano		日本原燃
炉内構造物	Westinghouse		Framatome (旧Valinox) Eiffage	Doosan	三菱重工業 日立GE 東芝ESS
原子炉容器			Framatome	Doosan	三菱重工業 IHI
鍛造品	North American Forgemasters (※)	Sheffield Forgemasters (※)	クルゾ・フォルジュ	Doosan	日本製鋼所M&E
格納容器 ・建屋	Bechtel Newport News Industrial	Baylor	Bouygues	GS E&C, SAMSUNG, HYUNDAI E&C, DAEWOO E&C, SK E&C, DAELIM E&C	三菱重工業 IHI
ポンプ	Curtiss-Wright Hayward Tyler Gardner Davis Nash Flowserve SPX FLOW	Selwood	Framatome アルストム・パワーシステムズ	Doosan CW-Hydro HYOSUNG GOODSPRINGS	三菱重工業 日立GE 東芝ESS 荏原製作所 関水社
バルブ	Georgia Transformer Enertech Crane Nuclear Chromalox Inc.	IMI Critical Engineering	アルストム・パワーシステムズ Daher Valco (旧Guichon Valves) Velan	Doosan PK Valve Samshin	TVE 岡野バルブ 平田バルブ
蒸気発生器			Framatome Valinox Nucleaire	Doosan	三菱重工業
蒸気タービン			アルストム・パワーシステムズ	Doosan	三菱重工業 東芝ESS

※米英の鍛造品メーカーは300t以上の重量の大型インゴット加工設備を所有していない

出所：各国公表資料、ヒアリング等を基に資源エネルギー庁作成

- 米英仏では、エネルギー政策上の原子力の価値に加え、自国のサプライチェーンや技術の現状を踏まえ、産業政策の観点から新設炉型を決定し、R&Dやサプライチェーン支援に大規模資金を投入。日本においても、原子力産業の成長、地域経済・雇用への波及、経済安全保障

等の産業政策の視点から、サプライチェーン戦略と一体的な技術ロードマップを策定していくことが必要。

- 原子力は、案件獲得した場合の1基あたりの市場規模も数百億円～数千億円規模になることが見込まれる中で、海外市場で一定の競争力を有するサプライヤも存在しており、相手国のサプライチェーンの弱みを補完する形で初号機プロジェクトに参画し、実績を積むことで、将来市場を獲得できる可能性。
- ロシアによるウクライナ侵攻等の世界情勢の変化を受け、原子力のような機微技術について、自国で安定的に活用していくため、有志国による共同サプライチェーンを構築していく期待が高まっており、2022年5月の日米首脳会談においても革新原子炉及び小型軽水炉の開発及び世界展開の加速とそのための強靱な原子力サプライチェーンを構築することで一致。今後、その他の有志国に原子力サプライチェーン共同構築の輪を広げていくことが重要。

コラム：革新炉型毎のグローバル市場獲得ポテンシャル

- **革新軽水炉**：各国がEPR、AP1000といった革新軽水炉の建設を表明。市場のポテンシャルも高く、仏国が強固なサプライチェーンを構築する中でも、今後の欧州大陸での建設需要は供給能力を上回る可能性。特に、自国の産業基盤が仏ほど強固ではない英国・東欧において、日本サプライヤに参入ポテンシャルあり。
- **高速炉・高温ガス炉**：米国、英国、ポーランドはサプライチェーンが確立されておらず、「もんじゅ」・「HTTR」の建設経験を持つ日本と協力を志向。初号機開発に食い込むことは今後の海外市場の獲得のためには非常に重要であり、世界で日本にしかない技術・ノウハウを武器に、建設プロジェクトへの参画、標準を獲得するポテンシャルあり。
- **小型軽水炉**：米国、カナダは自国のサプライチェーンの国産率の上昇を志向しているが、主要機器の製造能力を持つ日本への期待あり。既に米国、カナダ発で東欧へ展開する動きもあり、国内メーカーもこれらに積極的に参画しサプライチェーンを確立するとともに、今後、アジア展開の際には機器製造拠点となるポテンシャルも。

表4. 革新炉型毎のグローバル市場獲得ポテンシャル

炉型	対象国	市場規模※	機器・部材例	備考
EPR	英、仏、東欧 (18基～)	250億～/基	大型鍛造品、ポンプ 蒸気発生器、原子炉容器等 伝熱管、バルブ 等	仏英において、大型の革新軽水炉（EPR、EPR2）の建設の動き。日本勢による受注確度が高い機器・部材もあり、仏国内の生産能力次第では更なる市場拡大が見込める可能性。
AP1000	欧州 (数基～)	250億～/基	タービン、格納容器 大型鍛造品、ポンプ、バルブ 等	WECはAP1000について、グローバルで受注を目指す。米ボーグルでは日本企業の実績あり、第三国展開においても市場獲得の可能性。
高温ガス炉	英、ポーランド (各1基)	400億～/基	制御棒駆動装置、炉内構造物 燃料交換機、大型鍛造品 バルブ等	英国実証炉やポーランド研究炉について、HTTRで実績をもつJAEAと連携できる可能性。自国調達目標が50%となっており、主要な構成機器・部材について、連携の可能性。
高速炉 Natrium	米 (1基)	200億～/基	燃料交換機、制御棒計装 原子炉容器、バルブ等	JAEAの常陽・もんじゅの経験を活かし、米国テラパワー社と協力覚書を締結。炉容器、炉内構造物、燃料取扱交換機、Na冷却系統機器等、連携の可能性。Buy American条項（自国調達率75%以上）に留意。
BWRX-300	カナダ、米等 (7基～)	60億～/基	原子炉容器部材 制御棒駆動機構 バルブ、炉内構造物等	日立GEやIHIは資本提携した上で、機器・部材提供で連携の可能性。米加ともに自国の産業振興の観点で自国調達率を重視。
VOYGR (NuScale)	米、ルーマニア等 (1基～)	100億～/基	格納容器、伝熱管、溶接材 等	

※市場規模はメーカーヒアリングで可能性があるとして評価された機器・部材の想定販売額を積み上げたもの

出所：サプライヤヒアリング、公表情報等を基に資源エネルギー庁作成

4.2. 革新炉開発を巡る悪循環を断ち切る対応の方向性

4.2.1. 2050年カーボンニュートラルに向けた革新炉開発ポートフォリオとロードマップ

- 原子力はカーボンニュートラル等の社会革新に貢献するポテンシャルを有する一方、開発・利用の正当性については様々な意見や懸念も存在。関係者の理解や予見可能性を確保する上でも、「開発・利用に当たっての意義・原則」を再確認・明確化していく。
- 原子力利用の範囲やあり方を制御しつつ、政策の一貫性・継続性を担保するためにも、「カーボンニュートラル達成・エネルギー安全保障への貢献等といった社会的価値の実現」を、原子力を開発・利用していく上での中長期的な根拠・目標として明確化していく。
- その上で、産業界・大学・研究機関等の様々なステークホルダーの意思決定に資する、リソース配分の日安や開発の時間軸を共有することが必要。
- 自国の強み・サプライチェーンを軸に、2050年に向けた革新炉開発のポートフォリオを明確化する。具体的には、
 - **革新軽水炉**：足元で我が国が強みとする軽水炉サプライチェーンを繋ぎ、規制の予見性が高く実現時期が見通せ、革新的安全性向上を図る革新軽水炉の開発を最優先に取り組む。
 - **小型軽水炉**：同時に、安全保障の観点から国際協力貢献とサプライチェーンの事業機会獲得の支援を行いつつ、米欧において2030年前後に運転開始を目指す先行プロジェクトの状況を踏まえながら、投資リスク低減や分散電源等の将来ニーズを念頭に置いたオプション確保のため、小型軽水炉の開発に取り組む。
 - **高速炉**：高速炉技術を活用することによって、既存の軽水炉を含めた原子力技術が資源循環性を獲得することを可能とする。21世紀半ば頃に高速炉の運転開始を期待するとした高速炉開発会議・戦略ワーキンググループにおける議論も踏まえ、開発炉型を具体化していく。「常陽」「もんじゅ」の経験を強みとして最大限活用し、国際連携も推進。
 - **高温ガス炉**：産業の脱炭素のためにカーボンフリーの電力・熱・水素をコジェネレーションすることを念頭に、国際連携の可能性も追及しながら、高温ガス炉の開発を推進。試験炉「HTTR」を活用して熱利用・水素実証も推進。
 - **核融合**：核融合エネルギーの実現に向け、国際協力が進められているITER計画や幅広いアプローチ活動等（原型炉に向けた設計活動）を通じて、核融合発電に必須となる基幹技術を着実に推進。
- 技術ごとの導入の時間軸のイメージを示し、それぞれの技術・炉型について、可能な範囲で具体的な開発工程のマイルストーンを示した技術ロードマップを策定し、継続的にメンテナンス・改訂していく。【別添：技術ロードマップ】

4.2.2. システムエンジニアリング機能を強化するプロジェクトの創出・支援

- 海外と同様に、ロードマップに沿った実証プロジェクトの具体化が必要。その際、導入以降を見越したメーカーのシステムエンジニアリング機能の強化等を念頭に、概念・基本設計に並行して、具体的開発課題の検討を官民で効果的に推進。
- 支援に当たっては、枢要技術への必要な資金の充当という観点に加え、海外や宇宙等の他産業の事例も参考に、SPC・ベンチャー等の活用による官民リソースの共用・育成も念頭に、柔軟な国による支援手法も検討。

- 革新炉開発はもとより、既存炉に係る安全性の向上、発電以外の分野における原子力の成果活用等も含めて、幅広い分野に裨益する原子力人材・技術の育成に必要な基盤インフラを明確化した上で、計画的に国研（日本原子力研究開発機構）等に整備していくことが必要。

4.2.3. 安全性に優れた革新炉開発推進のための規制対話の推進、ファイナンス・バックエンドを含めた事業環境の整備

- 革新炉の導入に際しては、世界各国においても、既存炉との技術的な差異を踏まえた新規制に対応することに伴う安全審査の長期化、他電源と比較して電源投資に占める固定費の割合が大きく、市場価格の変動等に伴う投資回収のボラティリティの増大といった課題に直面し、ビジネスとしての予見性低下が課題に。
- 短期的には事業予見性低下が見られる一方で、エネルギー密度が高い原子力を活用することにより、中長期的に収支相償性・経済効率性を具現化し、低廉なエネルギー供給を実現していくことができる。こうした課題を克服するための制度面・政策面での対応が必要。
- さらに、個別の事業者では解決が難しいバックエンドの共通課題に伴う原子力事業全体の予見性低下に対しても対応が必要。
- 海外の事例等も参考に、革新炉のポテンシャルを発揮するための制度・政策面でのサポートの検討や、事業者自らの新たな取組を進めていく。

円滑な導入に向けた安全規制当局との共通理解の醸成

- 海外事例等を参考に、設置許可申請の事前段階を含めた規制当局との対話等を通じて共通理解を醸成し、予見性を確保しつつ、より安全な炉の開発を進めていくことが必要。
- そのため、産業界は、政府のサポートも得つつ、規制審査のプロセスや技術的な論点のあり方について、規制当局に双方向の対話を働きかけ、能動的・積極的な提案を行っていくべきである。

投資回収期間の長期化等への対応

- カーボンニュートラル実現に資する脱炭素電源の確保、化石資源に依存しない経済安全保障の確立、短期の需給調整にも資する低廉で安定したベースロード電源の確保という観点から、原子力電源の特性・意義を、同様の他電源とともに整理していく。
- その上で、投資回収期間の長さ、電力自由化に伴う費用回収のボラティリティ増大といった課題への制度的な対応策を検討していく。

バックエンド問題への対応

- 使用済燃料の再処理や高レベル放射性廃棄物の最終処分、通常炉の廃止措置や低レベル放射性廃棄物の処理処分等、一事業者が単独で対応するよりも国全体で対応すべきバックエンドの課題が、原子力事業全体の予見性を低下させており、事業者が革新炉を導入する際にも、ハードルとなっている。

- こうした問題について、今後とも継続して、国が前面に立って解決に取り組んでいくことを明確化するとともに、廃止措置等の具体的な課題について、事業者の取組をサポートしていくためのさらなる踏み込みが必要。

4.2.4. 民間のイノベーションを喚起する開発の司令塔

- 過去の研究開発における「護送船団方式」から脱却すると同時に、導入後も見越してプロジェクトベースの開発を進めていくにあたり、開発プロジェクトのマネジメントの強化を進めていくことが必須。

司令塔機能の創設と役割分担の明確化

- 開発プロジェクトマネジメント強化のため、ステークホルダーと能動的に調整を行いつつ、システム全体を一貫性をもって管理する、研究開発プロジェクトの「へそ」となる機能（司令塔）を創設することが必要。
- あわせて、システム設計や発注を統括する中核企業を設定し、プロジェクトへの産業界の参画を効果的に確保していくことを目指す。
- 国研（JAEA）は、司令塔機能の設置・運営や、民間企業への技術支援に主体的に関与しつつ、独自の機能としては、開発に必要な基盤インフラの整備、（プロジェクトベースの取組と対比した）熟度の比較的低い研究や人材育成・基準規格等の基盤整備に注力する等、関係者の役割分担を明確化していく。

プロジェクトマネジメント等に通じた民間人材の活用

- 海外では、開発プロジェクト自体に、プロジェクトマネジメントの知見を有する民間企業の人材・ノウハウを取り込むべく、様々な官民連携の手法を工夫。
- 我が国においても、司令塔機能に、ユーザー／オペレーターとしての知見を有する電力会社等、民間企業のプロマネ人材・知見を取り込むことが必須。具体的なチーム組成に向けて、官民協働の枠組みを検討していく。

4.2.5. 革新炉サプライヤの挑戦の支援

- 事業環境変化やプロジェクト不在の期間長期化で、ものづくりの技能・人材維持や事業継続といった課題があらゆる工程で顕在化。こうした悩みは、サプライチェーン階層ごとに様々に異なっており、ニーズに応じたきめ細やかな支援メニューを準備し、ハンズオンで積極サポートを行う。

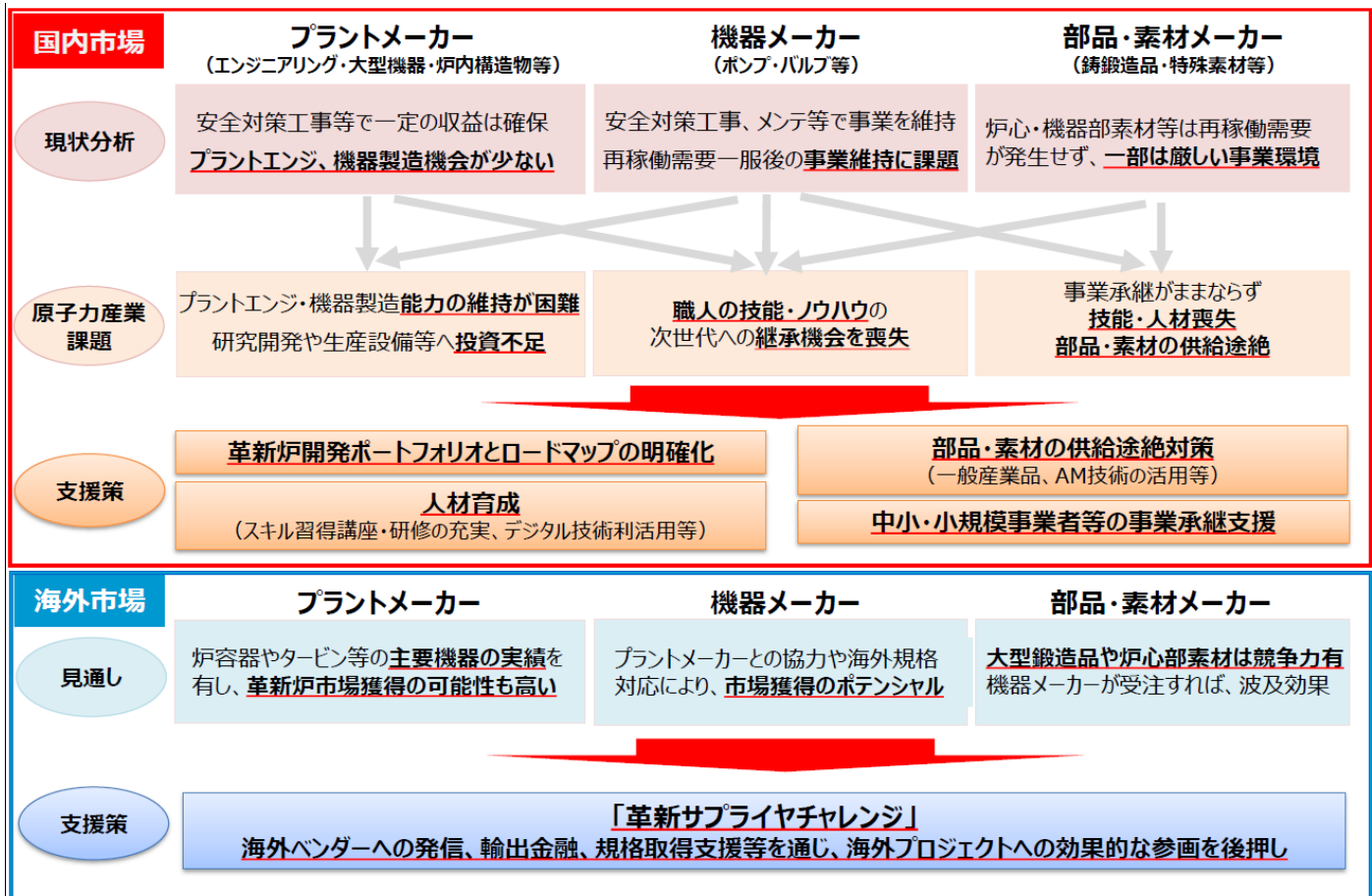


図 4. 原子力サプライチェーン強化に向けた課題と対策

海外プロジェクトへの効果的な参画サポート

- 炉心・圧力容器等の枢要機器の製造工程では、長期間にわたりプロジェクトがない中で、エンジニアリング・機器製造能力の維持が大きな課題に。従来の「日の丸フルセット展開」が困難な中、個別サプライヤが自ら販路を開拓していけるよう、JBIC等の政府系金融機関、原子力産業協会、JETRO等と連携し、海外プロジェクトへの参画サポート（顧客確保・海外規格取得への支援、トップセールス等）を積極的に行っていく。

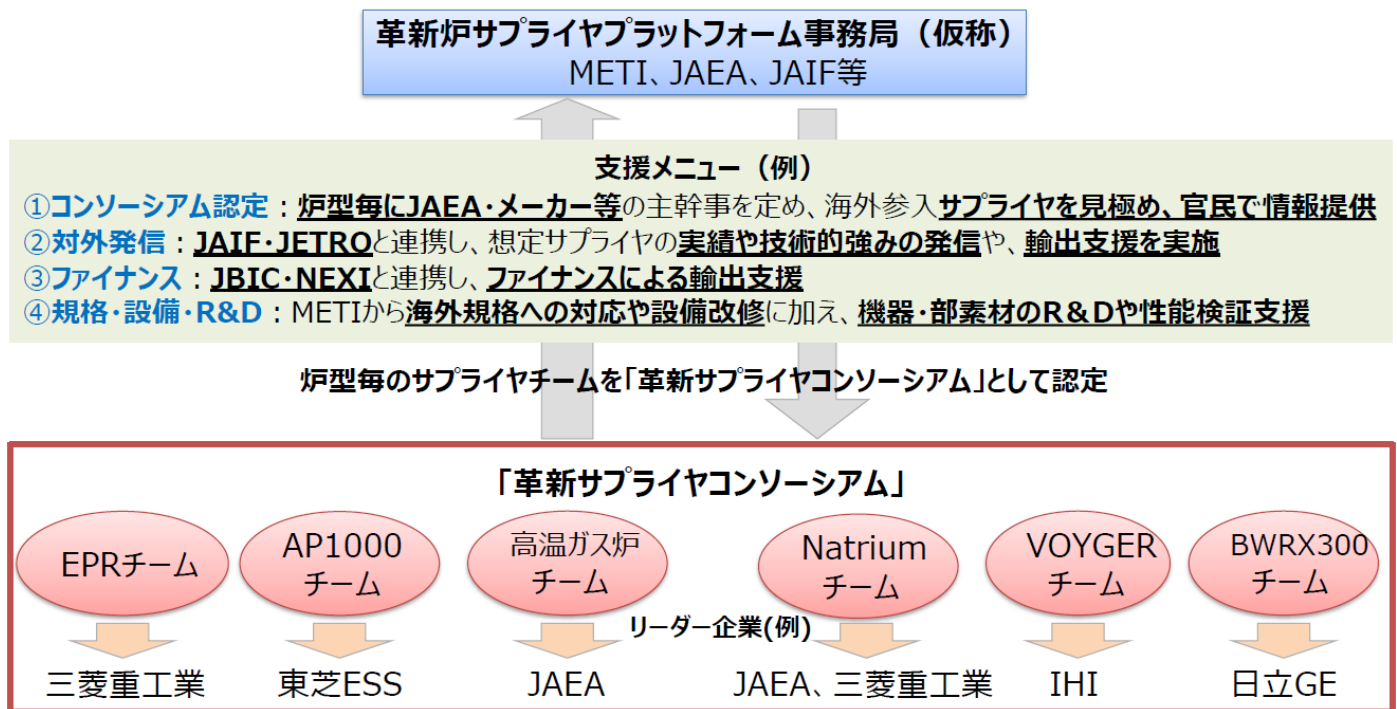


図5. 海外プロジェクトへの効果的な参画を促す仕組み（革新サプライヤチャレンジ）

部品・素材の供給途絶対策、事業承継支援

- 素材・部品製造工程等を中心に、材料の供給途絶リスクが高まっている他、中小・小規模事業者における事業承継も大きな課題に。産業大での実態把握・支援体制の構築に加え、こうした枠組みも通じ、事業承継等に対する政策支援ツールの最大限の活用を働きかけていく。

人材育成・技術承継支援

- 全般的課題である現場をはじめとした技術基盤の維持へ、デジタル技術の活用（省人化）や業界横断的な人材育成システムの構築等を進めるべく、政府も積極的に支援していく。

表5. 革新炉開発を巡る悪循環を断ち切る対応の方向性

課題	課題への対応の方向性（イメージ）
① 革新炉開発に係る方向性の明瞭化	<p>基本方針の明確化、開発のポートフォリオとロードマップの策定</p> <ul style="list-style-type: none"> 中長期目標を明確化（カーボンニュートラル、エネルギー安全保障） 開発のポートフォリオを明確化・導入の時間軸のイメージを提示 開発マイルストーン示す技術ロードマップを策定・フォローアップ・改訂
② 開発予算・施設の整備	<p>システムエンジニアリング機能を強化するプロジェクトの創出・支援</p> <ul style="list-style-type: none"> 実証プロジェクトの概念・基本設計、具体的開発課題の検討を推進 資金の充当、SPC・ベンチャー等の活用 人材・技術基盤に資するインフラを明確化・計画的に整備
③ 革新炉開発を支える事業環境の整備	<p>導入に必要な事業環境の整備</p> <ul style="list-style-type: none"> 円滑な導入に向けた安全規制当局との共通理解の醸成：申請事前段階の対話等も通じて、より安全な炉の円滑な導入に向けた共通理解を醸成 投資回収期間の長期化等への対応：投資回収期間の長期化、費用回収のポラリティ増大といった課題への制度的な対応策を検討 バックエンド問題への対応：バックエンドの諸課題について、国が前面に立って解決に取り組むことを明確化・政策対応
④ 開発の司令塔機能の強化	<p>民間のイノベーションを喚起する開発の司令塔機能</p> <ul style="list-style-type: none"> 司令塔機能の創設と役割分担の明確化：ステークホルダーとの調整、システム全体の一貫性担保を行う司令塔機能を創設、設計統括する中核企業を設定 プロマネ等に通じた民間人材の活用：民間のプロマネ人材の活用、民間企業の参画を確保しつつ、基盤整備・基礎研究を行う国研等と効率的に役割分担
⑤ サプライチェーンの維持・強化	<p>サプライチェーン各工程に即した多様な支援メニューの整備・導入</p> <ul style="list-style-type: none"> 海外プロジェクトへの効果的な参画サポート：販路開拓へ、政府による海外プロジェクトへの参画サポート 部品・素材の供給途絶対策、事業承継支援：部材の供給途絶リスクや事業承継問題への対応へ、産業大での実態把握・支援体制の構築、中小企業支援 人材育成・技術承継支援：技術基盤維持へ、デジタル技術の活用支援や、業界横断的な人材育成システムの構築支援等

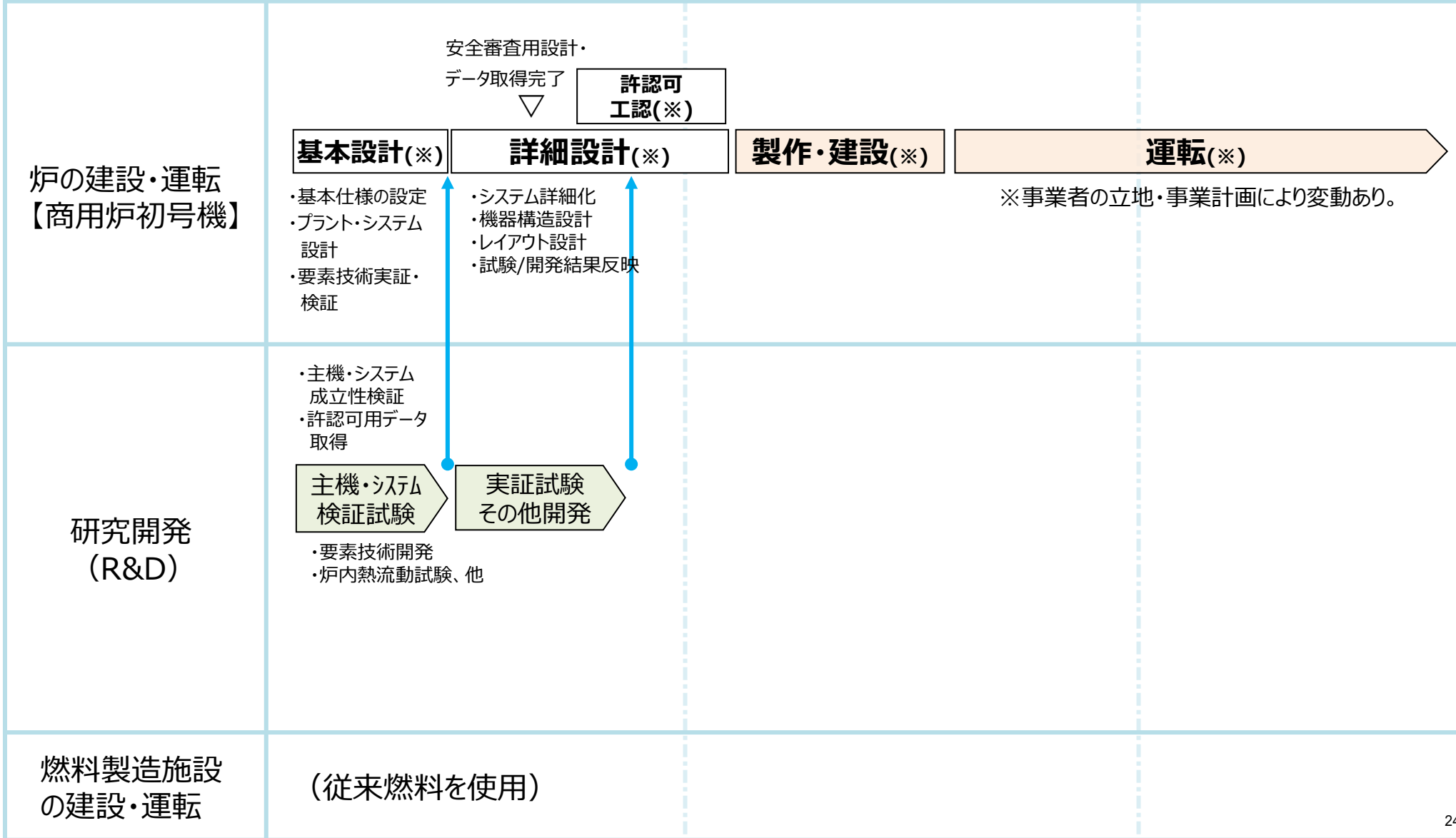
導入に向けた技術ロードマップ^o (革新軽水炉)

別添

2020年

2030年

2040年



※事業者の立地・事業計画により変動あり。

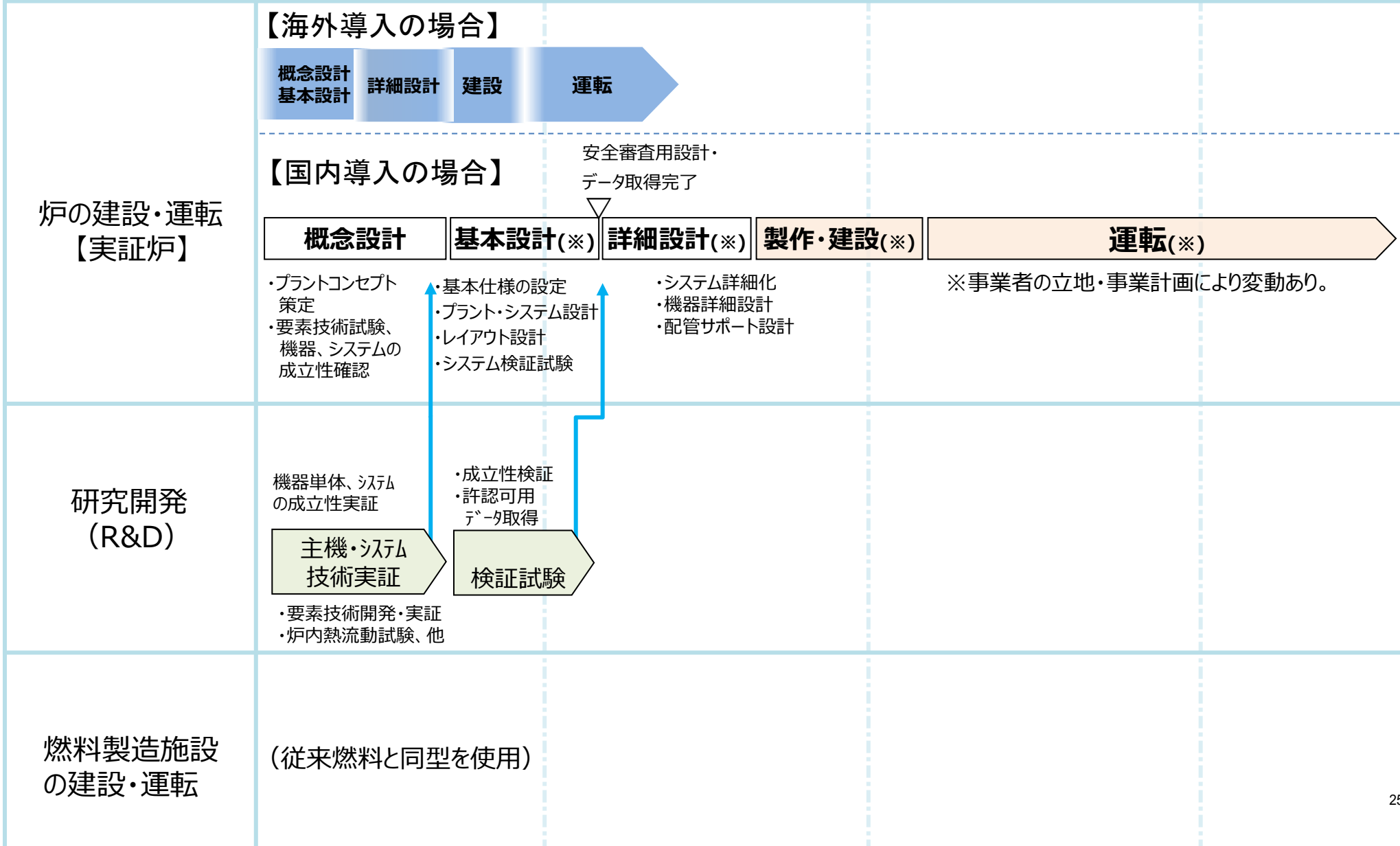
導入に向けた技術ロードマップ（小型軽水炉）

2020年

2030年

2040年

2050年



導入に向けた技術ロードマップ（高速炉）

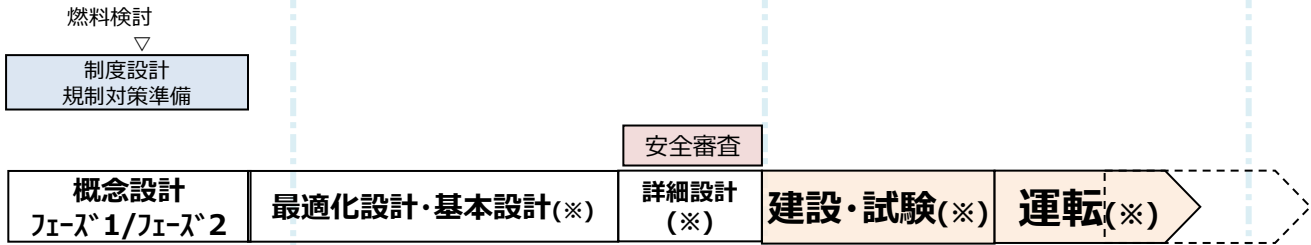
2020年

2030年

2040年

2050年

炉の建設・運転
【実証炉】



- ・機器、システムの成立性の確認
- ・建設コストの算定
- ・基本仕様の設定

- ・技術仕様の設定
- ・プラント設計、システム設計
- ・荷重条件の設定、安全評価等

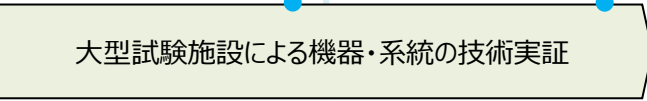
- ・構造、形状寸法、レイアウト等の設定

※事業者の立地・事業計画により変動あり。

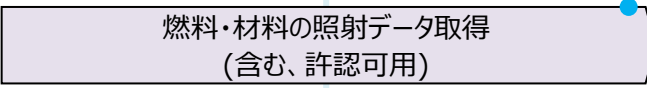
研究開発
(R&D)

機器単体、システムの成立性の実証・確認

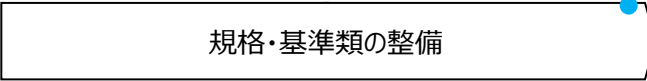
運転性などのシステム性能の実証・確認



- ・冷却材機器開発試験施設が必要 (e.g. ナトリウム炉AtheNa)



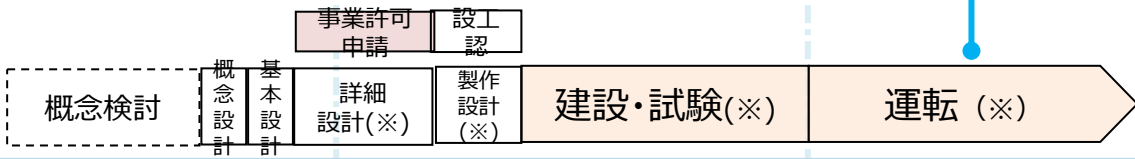
- ・照射施設が必要 (e.g. 米軽水炉試験炉ATR、高速実験炉常陽)



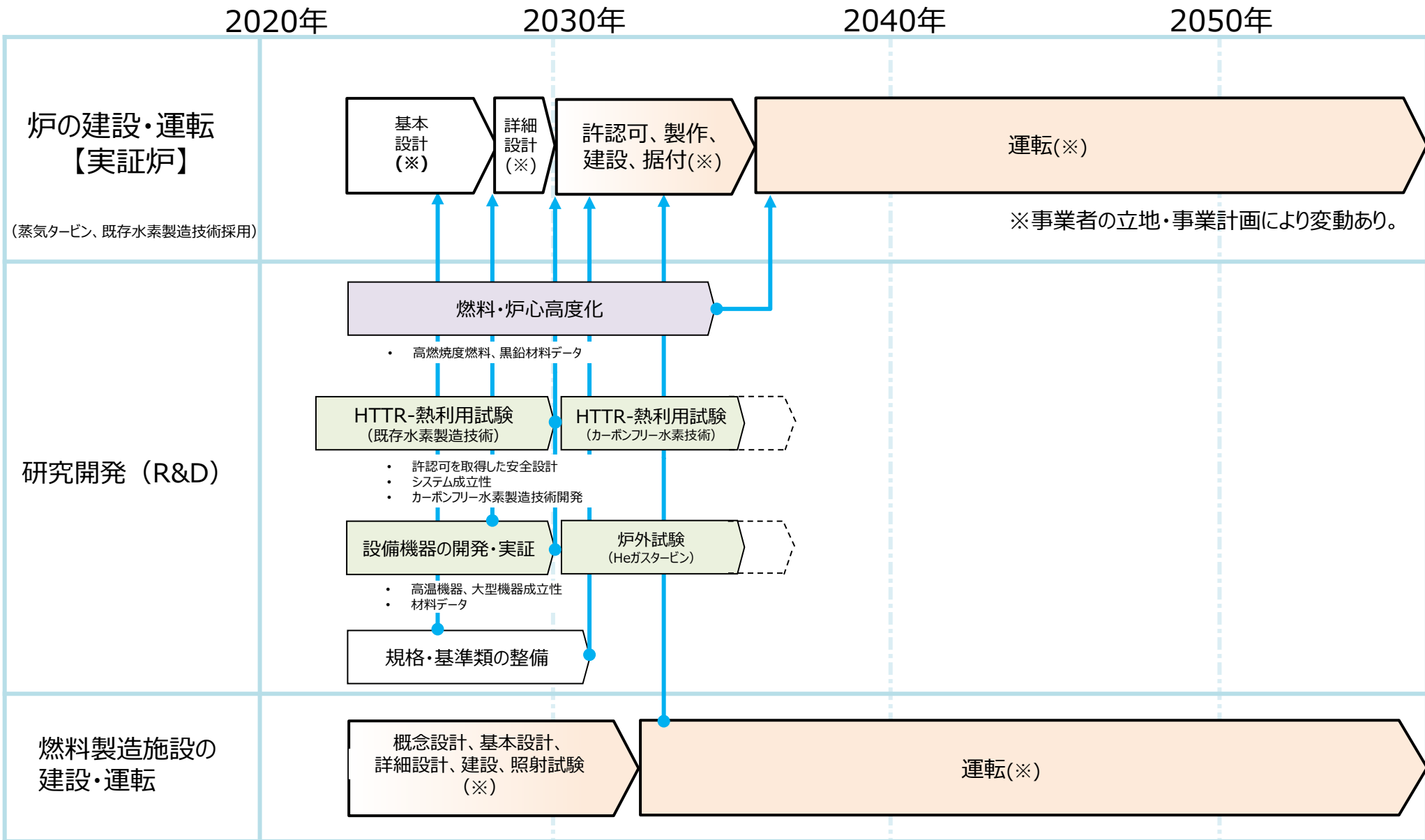
- ・機器の性能データ取得のための各種要素試験が必要

燃料供給

燃料製造施設の建設・運転



導入に向けた技術ロードマップ（高温ガス炉）



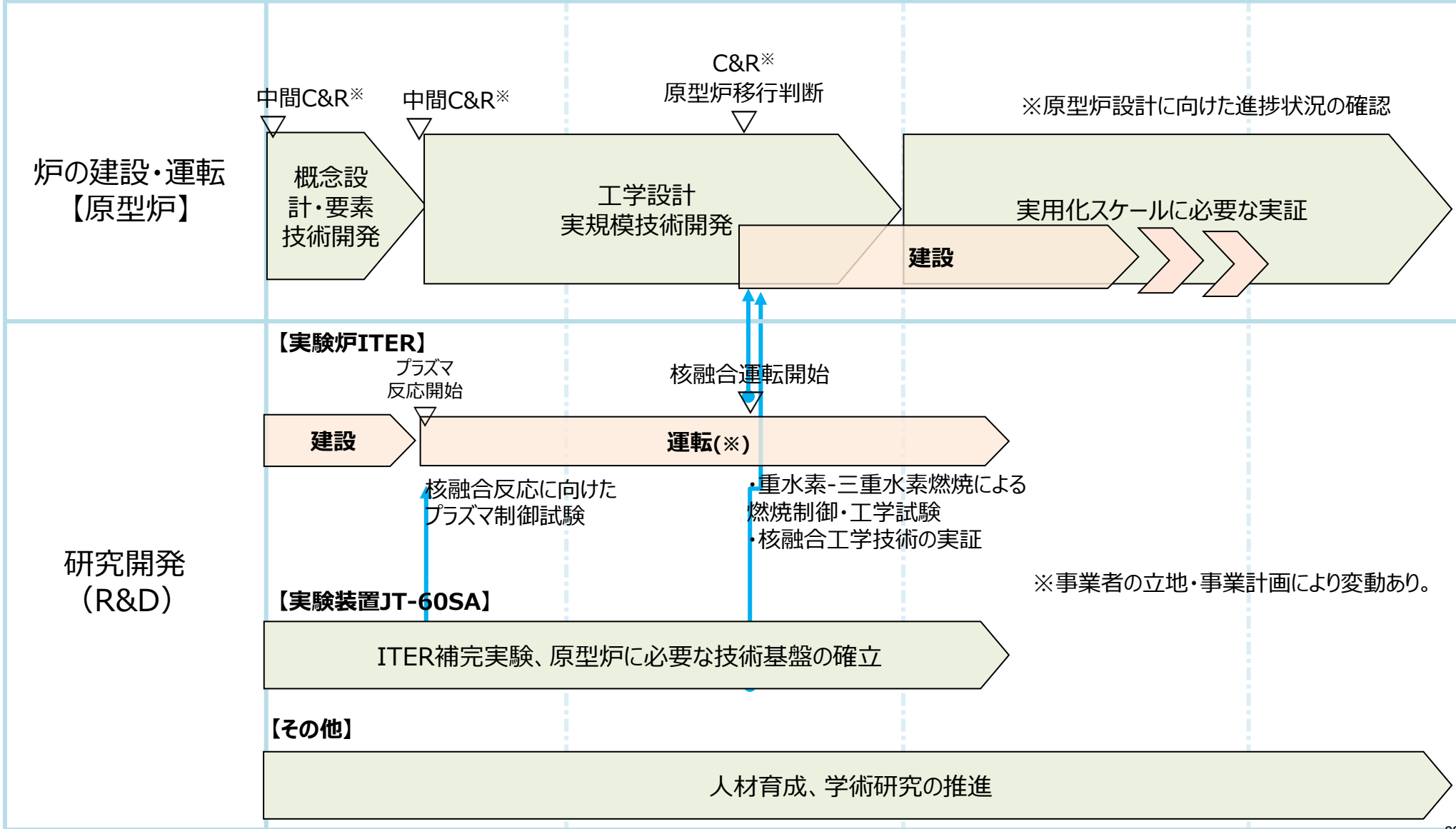
導入に向けた技術ロードマップ（核融合炉）

2020年

2030年

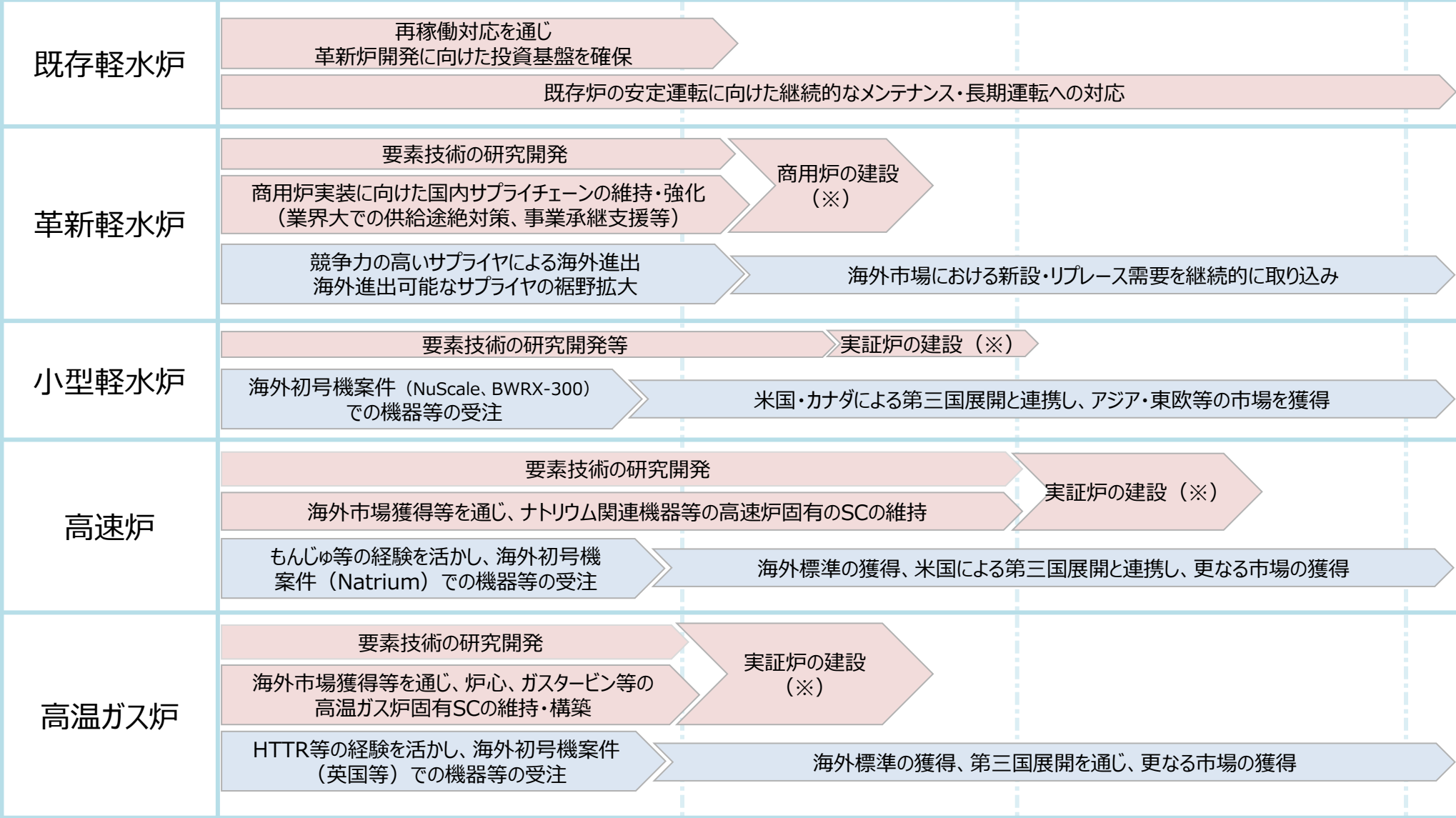
2040年

2050年



原子力サプライチェーンによる市場獲得戦略

2020年 2030年 2040年 2050年



※事業者の立地・事業計画により変動あり。

:国内市場
 :海外市場